https://jmme.um.ac.ir/   DOI: 10.22067/jmme.2022.74973.1039

تاثیر عملیات کوئنچ و پارتیشن‌بندی بر ریزساختار و خواص کششی یک فولاد متوسط کربن پرسیلیسیم*

مقاله پژوهشی

علی اکبر عابدینی[۱]   حبیب اله رستگاری کوپایی[۲]   سید محمد امام[۳]

چکیده *یکی از روش‌های کاربردی جهت توسعه فولادهای استحکام بالا با انعطاف‌پذیری مناسب، عملیات حرارتی کوئنچ و پارتیشن‌بندی به منظور ایجاد یک ریزساختار میکروکامپوزیتی (مارتنزیت+آستنیت باقیمانده) است. به کمک این روش می‌توان با هزینه اندک، ترکیبی فوق‌العاده از خواص مکانیکی را در یک فولاد کم آلیاژ بوجود آورد. در پژوهش حاضر، فولاد متوسط کربن پرسیلیسیم ۱/۷۱۰۲ با اعمال فرآیندهای کوئنچ و پارتیشن‌بندی مورد مطالعه قرار گرفته است و تاثیر پارامترهای مختلف از جمله دمای کوئنچ (محدوده دمایی ۱۷۰ الی ۲۳۰ درجه سانتیگراد) و زمان پارتیشن‌بندی (۳ الی ۳۰ دقیقه) روی ریزساختار و خواص کششی بررسی شده است. ریزساختار توسط میکروسکوپ نوری بررسی شده و کسر حجمی آستنیت باقی‌مانده، توسط تکنیک پراش پرتوی ایکس اندازه‌گیری شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که ریزساختار میکروکامپوزیتی پس از عملیات حرارتی بوجود آمده است. افزایش زمان پارتیشن‌بندی باعث کاهش آستنیت باقیمانده و تشکیل رسوبات کاربیدی می‌گردد همچنین با افزایش دمای کوئنچ در زمان پارتیشن بندی ۳ دقیقه ، درصد آستنیت باقی‌مانده و پایدارشده افزایش یافته است. بهترین خواص کششی مربوط به نمونه کوئنچ شده در ۱۷۰ درجه سانتیگراد و پارتیشن‌بندی شده در ۳۰۰ درجه سانتیگراد به مدت ۸ دقیقه با استحکام کششی ۱۹۹۷ مگاپاسکال، استحکام تسلیم ۱۷۳۰ مگاپاسکال، ازدیاد طول ۱۰/۳ درصد و میزان کاهش سطح مقطع ۴۸ درصد می‌باشد.*

واژه های کلیدی عملیات حرارتی، کوئنچ و پارتیشن‌بندی، فولاد متوسط کربنِ پرسیلیسیم، خواص مکانیکی، ریزساختار

مقدمه

تولید فولادهایی با استحکام بالا و همچنین انعطاف‌پذیر، در صنایع مختلف جهت ساخت قطعات سبک و مستحکم در حال توسعه و رشد می‌باشد. همچنین ساخت فنرهایی با استحکام و شکل‌پذیری بالا و قیمت مناسب، یکی از چالش‌های صنعت می باشد. فشار وارد آمده به کمک فنر خودرو در جاده‌های ناهموار در صورت استفاده از فنرهایی با جنس نامناسب، موجب شکست این قطعه خواهد شد. همچنین ساخت سازه‌های عظیم و پیشرفت های سریع در تولید خودروهایی با سرعت و شتاب بالا و به دنبال آن افزایش میزان تصادفات و خسارت‌های جانی و مالی ناشی از آن، محققان را وادار کرده به دنبال راهکار و پیشنهادهایی در جهت توسعه فرآیند تولید قطعات و ورق‌های فولادی با استحکام کششی بالا به همراه شکل‌پذیری زیاد باشند. لذا دستیابی به این خواص، نیازمند صرف هزینه‌های بالا برای تولید فولادهای آلیاژی خاص می‌باشد؛ که معمولاً موجب افزایش وزن سازه و خودرو نیز می‌شوند. این امر موجب بروز زیان‌های زیست محیطی، آلایندگی شهرها و افزایش مصرف سوخت می‌شود [1]. استفاده از فرآیند کوئنچ و پارتیشن‌بندی کمک شایانی در جهت حذف دغدغه‌های فوق کرده و دستیابی به تولید فولاد و به طبع آن قطعات و ورق‌های فولادی با استحکام کششی بالا به همراه شکل پذیری زیاد را میسر نموده است [2].

ریزساختار اغلب آلیاژهای فلزی توسط عملیات حرارتی، به منظور دستیابی به خصوصیات مطلوب، اصلاح می‌شود [2]. فرآیند کوئنچ و پارتیشن‌بندی به عنوان راهکار جدیدی در جهت دستیابی به فولادهایی با ترکیب استحکام و انعطاف‌پذیری بالا پیشنهاد شده است [3-5]. در فرآیند کوئنچ و پارتیشن‌بندی، با تنظیم دمای آستنیته کردن، دمای کوئنچ (زیر دمای شروع تشکیل مارتنزیت)، مدت زمان نگهداری در این دما، حرارت‌دهی مجدد بالای دمای شروع تشکیل مارتنزیت، امکان ایجاد مقادیر مختلفی از فاز مارتنزیت و آستنیت باقی‌مانده بوجود می‌آید. از طرفی، عناصر آلیاژی مختلف نیز اثرات متفاوتی بر روی تشکیل این فازها در ریزساختار دارند [6].

تحت شرایط ایجاد شده در فرآیند کوئنچ و پارتیشن‌بندی می‌توان ترکیبی مناسب از استحکام بالا و شکل‌پذیری مناسب را

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۰/۱۱/۷ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۱/۲/۱۸ می‌باشد.

(۱) دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند
(۲) نویسنده مسئول: استادیار، مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند
(۳) استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند
Email: rastegary@birjandut.ac.ir

برای فولادهای کم‌آلیاژ بدست آورد [7]. پایدارسازی آستنیت باقی‌مانده تا دمای محیط باعث بهبود شکل‌پذیری فولاد می‌شود. علاوه بر این، آستنیت تحت بارگذاری مکانیکی به مارتنزیت تبدیل شده و باعث افزایش بیشتر استحکام می‌شود. به عبارت دیگر، رفتار کارسختی فولاد متاثر از میزان آستنیت باقی‌مانده در ریزساختار می‌باشد. فولادهایی که برای عملیات حرارتی کوئنچ و پارتیشن‌بندی مورد استفاده قرار می‌گیرند، باید دارای مقدار مشخصی کربن برای سخت شدن باشند. علاوه بر این، عنصر سیلیسیم برای جلوگیری از تشکیل کاربید و منگنز برای گسترش ناحیه فاز گاما نقش موثری دارند [3,8,9].

تحقیقات متعددی در این زمینه صورت گرفته است؛ برای مثال، در تحقیقی استحکام تسلیم ۱۰٤۷MPa و ازدیاد طول نسبی۱۵/۵٪ برای یک فولاد کم‌کربن به کمک این فرآیند بدست آمده است[۱۰]. بررسی‌ها بر روی فولادهای کم و متوسط کربن نشان می‌دهد، استفاده از فرآیند کوئنچ و پارتیشن‌بندی علاوه بر افزایش استحکام، باعث ایجاد ازدیاد طول نسبی قابل قبول در این دسته فولادها می‌گردد [11-13]. ژو و همکاران به کمک فرآیند کوئنچ و پارتیشن بندی ((Quenching & Partitioning (Q&P) بر روی فولادی مقاوم به سایش به استحکام ۱۷۳۰MPa و سختی ۵۱/۸ راکول‌سی و انرژی شکست ٢٤ ژول دست یافته‌اند [14]. فروزان و همکاران ریزساختار و خواص مکانیکی فولاد کم‌آلیاژ توسط Q&P را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که با کاهش دمای کوئنچ، سختی افزایش خواهد یافت [15]. اسچینو و همکاران با بررسی تاثیر فرآیند Q&P بر روی فولاد کم‌کربن منگنزدار به این نتیجه رسیدند که، افزایش میزان منگنز باعث افزایش خواص کششی فولاد خواهد شد [16]. باگلیانی و همکاران مقایسه‌ای از دو فرآیند Q&P و Q&T (Quenching & Temper) بر روی خواص فولادکربن متوسط کم‌آلیاژ انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که دمای کوئنچ بهینه‌ای وجود دارد که میزان استحکام و انعطاف‌پذیری در آن قابل قبول خواهد بود و همچنین خواص مکانیکی فولادهای Q&P بالاتر از نمونه‌های Q&T بوده است [17]. لو و همکاران خواص مکانیکی فولاد کربن متوسط Q&P شده را با فولاد Mn13Cr2 مقایسه کردند و نشان دادند؛ فولاد Q&P شده خواص مکانیکی و مقاومت در برابر سایش بهتری داشته است [18]. وانگ و هیانگ بهبود مقاومت در برابر شکنندگی هیدروژنی قطعات فولادی ۱۵۰۰ مگاپاسکال داغ که تحت Q&P قرار گرفته‌اند را مطالعه کردند انها دریافتند شکنندگی هیدروژنی فولاد بسیار با استحکام را با استفاده از خواص کوئنچ و پارتیشن‌بندی با دمای بالاتر از ٤٥٠ درجه می‌توان بهبود بخشید [19]. آریباس و همکاران اثر دمای پارتیشن بندی با دمای بالا را بر ریزساختار و خواص کششی چهار فولاد کم کربن با محتوای مختلف منگنز و نیکل بررسی کردند آنها دریافتند خصوصیات ریزساختار و حجم آستنیت باقی‌مانده به عناصر آلیاژی و شرایط پارتیشن‌بندی بستگی دارد [20]. اوید و همکاران ریز ساختار کوئنچ و پارتیشن‌بندی شده فولاد کربن متوسط را با استفاده از نتایج XRD مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که غنی‌سازی کربن آستنیت، نتیجه واکنش‌های رقابتی مانند تقسیم کربن از مارتنزیت، تبدیل بینیت و به دام انداختن کربن در مارتنزیت است [21]. ورکریسی و همکاران وابستگی دمایی رفتار استاتیکی و دینامیکی فولاد کم سیلیسیوم را با عملیات کوئنچ و پارتیشن بندی در محدوده دمایی منفی٤٠ تا ٨٠ درجه سانتیگراد بررسی کردند آنها دریافتند خواص کششی خیلی خوب فولاد به دلیل پایداری حرارتی بالای آستنیت در این دما حفظ شده است [22].

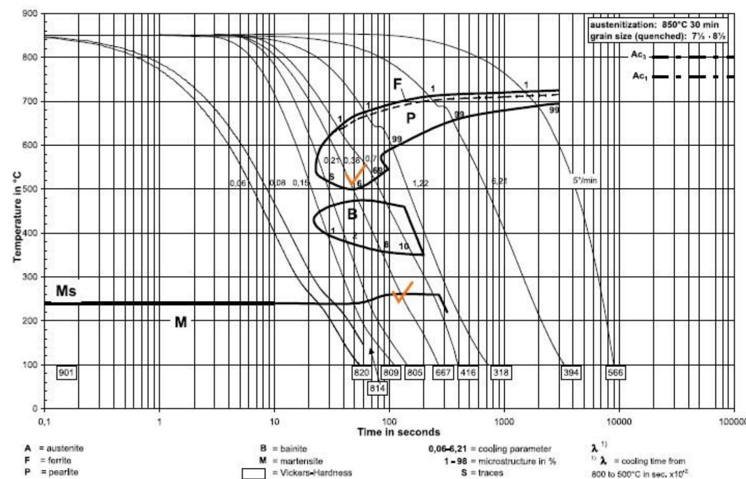
به هرحال، بررسی تحقیقات پیشین بیانگر عدم مطالعه بر روی فولاد پرکاربرد ۱/۷۱۰۲ بعنوان یک فولاد متوسط کربن پرسیلیسیم می‌باشد. هدف اصلی تحقیق حاضر، دستیابی به سیکل عملیات حرارتی بهینه‌ی کوئنچ و پارتیشن‌بندی جهت حصول ترکیب مناسبی از استحکام بالا و انعطاف‌پذیری مناسب برای این فولاد کم‌آلیاژ جهت گسترش کاربرد آن در فرآیند کشش سیم جهت تولید سیم های استحکام بالا است.

روش پژوهش

فولاد فنر آلیاژی با کربن متوسط با نام تجاری ۱/۷۱۰۲ و مشخصه 54SiCr6 به عنوان نمونه مورد بررسی در این پژوهش استفاده شده است که کاربرد فراوان در قطعات خودرو و واگن قطار دارد. این گرید به صورت مفتول نورد شده با قطر ۱۰mm از کارخانه فولاد آلیاژی ایران با مشخصه D7102 تهیه شده است و آنالیز شیمیایی نمونه‌ها بوسیله دستگاه کوانتومتری مدل foundry master توسط شرکت ریخته‌گری اصفهان انجام گرفته است. ترکیب شیمیایی نمونه بر حسب درصد وزنی در جدول (۱) گزارش شده است.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی آلیاژ مورد تحقیق

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
0.52	1.4	0.64	0.012	0.003	0.62	0.0024	0.0416



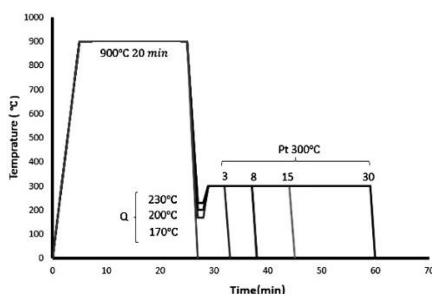
شکل ۱ دیاگرام TTTفولاد مورد مطالعه مطابق استاندارد DIN EN 10089

از دیاگرام دما-زمان-استحاله (TTT) (Time Temperature Transformation) می‌توان به عنوان راهنمای تغییرات انجام شده در ریزساختار فولادها طی عملیات حرارتی و متناسب با سرعت سرمایش استفاده کرد. دیاگرام TTT فولاد مورد مطالعه در شکل (۱) نمایش داده شده است. براساس این دیاگرام، مدت زمان گذر از دماغه تشکیل پرلیت (محدوده دمایی ۸۵۰ الی ۵۵۰ درجه سانتیگراد) و اطمینان از تشکیل ساختار مارتنزیتی، حدود ۲۵ ثانیه است. از نرم افزار J Mat Pro 7.0 جهت تعیین دماهای بحرانی و تعیین دمای بهینه کوئنچ پارتیشن‌بندی استفاده شده است. دماهای بحرانی فولاد مورد مطالعه در جدول (۲)آورده شده است.

جدول ۲ دماهای بحران

M_s (Martensitic start)	M_f (Martensitic finish)	AC_1	AC_3
۲۸٦	۱٦٤	۷۲۳	۸۳۷

متغیرهای مورد بررســـی در فرآیند عملیات حرارتی، زمان پارتیشن‌بندی و دمای کوئنچ در نظر گرفته شد. کلیه نمونه‌ها تا دمای ۹۰۰°C (بالاتر از AC_3) در کوره الکتریکی آذرکوره مدل FM20p گرم شـدند و به مدت ۲۰ دقیقه جهت آسـتنیته شـدن کامل نگهداری گردیدند. سـپس پس از طی مراحل کوئنچ و پارتیشن‌بندی مطابق سیکل نشان داده شده در شکل (۲) تا دمای اتاق سرد شدند. جهت مقایسه خواص، یک نمونه نیز در شرایط کوئنچ شده (در روغن ۱۵ درجه سانتیگراد) آماده سازی گردید. هیچکدام از نمونه‌ها تحت تمپر قرار نگرفته اسـت. نمونه‌های عملیات حرارتی با قطر ۱۰mm و طول ۱۲۰mm بریده شـدند و سپس تحت عملیات Q&P قرار گرفتند.



شکل ۲ شماتیک عملیات Q&P

مطابق سـیکل عملیات حرارتی ارائه شـده، فرآیند عملیات حرارتی شامل مراحل زیر می باشد:

مرحله الف –آ ستنیته‌کردن فولاد به صورت کامل بالاتر از دمای AC_3 در دمای ۹۰۰°C به مدت ۲۰ دقیقه در کوره الکتریکی

مرحله ب –کوئنچ در دماهای ۲۰۰،۱۷۰ و ۲۳۰ °C در روغن حرارتی به مدت ۱دقیقه که مشخصات روغن مذکور در جدول (۳) آورده شده است.

جدول ۳ مشخصات روغن استفاده شده جهت کوئنچ نمونه‌ها

مشخصات فیزیکی – شیمیایی	گرانروی cSt ۱۰۰°C	شاخص گرانروی	حداقل نقطه اشتعال°C	حداکثر نقطه ریزش°C	دانسیته در ۱۵/٦ Kg/m3	قلیائیت کل MgKOH/g
روش آزمون	ASTM D-445	ASTM D-2270	ASTM D-92	ASTM D-97	ASTM D-1298	ASTM D-2896
بهران حرارت	٥/٥	١٠٣	٢٠٠	–٦	٨٧٠	

مرحله‌ج- گرمادهی مجدد قطعات نمونه تا دمای پارتیشن‌بندی ۳۰۰°C به صورت زمان متغیر۳، ۸، ۱۵ و ۳۰ دقیقه در کوره الکتریکی
مرحله د- خنک سازی نهایی در دمای اتاق

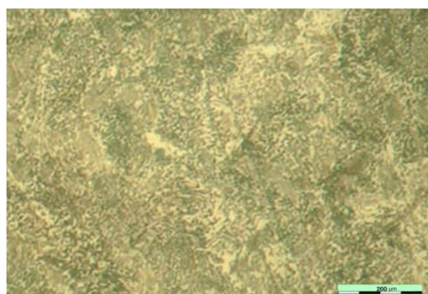
نامگذاری نمونه‌ها براساس دمای کوئنچ و زمان پارتیشن‌بندی انجام شده است. برای مثال، نمونه ۳-۱۷۰ مربوط به نمونه ایست که در ۱۷۰ درجه سانتیگراد کوئنچ و به مدت ۳ دقیقه پارتیشن‌بندی شده است. دمای پارتیشن‌بندی برای همه نمونه‌ها ۳۰۰ درجه سانتیگراد می باشد. لازم به ذکر است که تمام دماهای کوئنچ توسط ترمومتر اینفرارد اندازه‌گیری شد.

به منظور ارزیابی تغییرات ریزساختاری پس از آزمون‌های عملیات حرارتی از میکروسکوپ نوری مدل Meiji Techno-IM7200 مجهز به دوربین تصویربرداری استفاده شد. هدف از بررسی ریزساختاری نمونه‌های عملیات حرارتی، شناسایی تحولات ریزساختاری متاثر از تغییر پارامترهای عملیات حرارتی است. آماده سازی نمونه‌ها بوسیله روش سنباده‌زنی (ورق سنباده‌های ۸۰، ۱۲۰، ۳۲۰، ٤۰۰، ٦۰۰، ۸۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۲۰۰) و پولیش مکانیکی انجام شده است. محلول نایتال ۲ ٪ به عنوان اچ کننده استفاده شده است.

پس از عملیات حرارتی، نمونه‌های استاندارد آزمون کشش مطابق استاندارد ASTM E8 تهیه گردید. طول و قطر سنجه‌ی نمونه‌های کشش به ترتیب برابر ۳۰ و ٦ میلیمتر بود. آزمون کشش توسط دستگاه کشش Santam-STM250 و با نرخ کرنش مهندسی ۱۰mm/minانجام گرفت. درصد ازدیاد طول کل نمونه‌ها از طریق اندازه‌گیری اختلاف بین طول سنجه قبل و بعد از آزمون کشش و میانگین‌گیری سه نمونه به دست آمده است. آزمون سختی با دستگاهKOOPA-UV1 به روش برینل با ساچمه ۲/۵ میلیمتر و نیروی ۱۸۷/۵ کیلوگرم بر روی سه نقطه مختلف برای هر نمونه انجام شده است. آزمون XRD توسط دستگاه کمپانی Bruker مدل Advance d8 با ولتاژ ٤۰kV و آمپر ۳۰mA با لامپ تیوپ مس با طول موج ۱٫٥٤ آنگستروم انجام شده است.

نتایج و بحث

ریزساختار و خواص کششی ماده اولیه. ریزساختار فولاد متوسط کربن با نام تجاری ۱/۷۱۰۲ در شکل (۳) نمایش داده شده است. میزان سختی نمونه خام اولیه برابر ۲٦۱/٤ برنیل می‌باشد. همانطورکه واضح است، ریزساختار تقریبا پرلیتی بوده (نواحی لایه‌ای و تا حدودی شکسته شده که احتمالا ناشی از وقوع کروی شدن ناقص بوده) و مقادیر کمی فریت اولیه (نواحی روشن) در ریزساختار موجود است. سختی بدست آمده نیز متناسب با نوع ریزساختار می‌باشد. این ریزساختار نشان دهنده این است که میلگرد تولید شده پس از نوردگرم، به آهستگی سرد شده است.



شکل۳ ریزساختار فولاد ۱/۷۱۰۲ تهیه شده قبل از عملیات حرارتی

در جدول (٤) خواص کششی بدست آمده از نمونه اولیه آورده شده است. ملاحظه می‌شود که استحکام نهایی حدود ۹۳۸ مگاپاسکال، ازدیاد طول نسبی برای این نمونه برابر با ۱۰/۱٪ و میزان کاهش سطح مقطع برابر ٤۳٪ بوده است. علی‌رغم ازدیاد طول بیش از۱۰ درصد، تغییرشکل همگن کمتر از ۵ درصد است. از طرفی، با وجود استحکام زیر ۱۰۰۰ مگاپاسکال، حدود۱۰درصد انعطاف‌پذیری بدست آمده است که در فولادهای معمولی مرسوم می‌باشد. همانطورکه پیش از این نیز تاکید شد، هدف از این تحقیق، انجام فرآیند عملیات حرارتی کوئنچ و پارتیشن‌بندی به

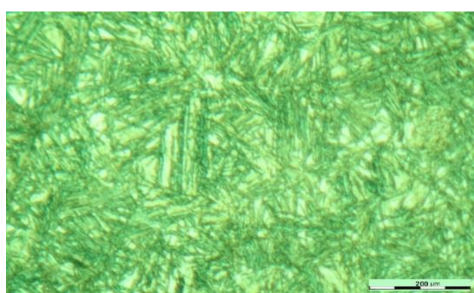
منظور افزایش قابل توجه استحکام بدون افت قابل توجه انعطاف‌پذیری می‌باشد که در ادامه نتایج آن آورده شده است.

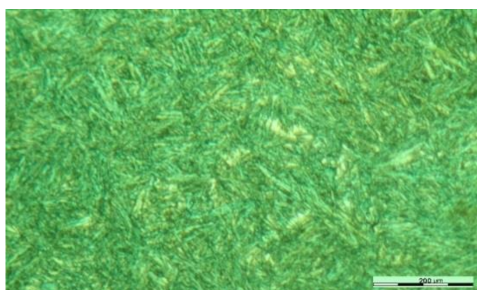
جدول ٤ خواص مکانیکی نمونه اولیه.

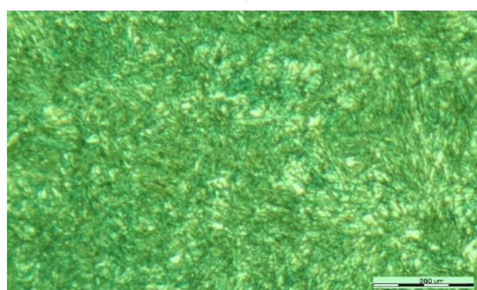
کاهش سطح مقطع٪	ازدیاد طول کل٪	ازدیاد طول یکنواخت٪	استحکام نهایی (MPa)	استحکام تسلیم (MPa)	عنوان قطعه
٤٣	۱۰/۱	٤/٧	۹۳۸/۲	۸٦۱/٦	نمونه خام

مشاهدات ریزساختاری. ریزساختار نمونه‌ها پس از انجام عملیات حرارتی کوئنچ و پارتیشن‌بندی بوسیله میکروسکوپ نوری مورد مطالعه قرار گرفت. جهت تحلیل اجزا ریزساختار، از آنالیز XRD (X-ray powder diffraction)، برای مشخص شدن فازهای موجود در ریزساختار استفاده شده است. در ادامه تصاویر نوری به دست آمده از ساختار نمونه‌ها، بر اساس شرایط اعمال شده در عملیات کوئنچ و پارتیشن‌بندی بررسی می‌شود.

تاثیر دمای کوئنچ. در شکل (٤) ریزساختار بدست آمده پس از کوئنچ در دماهای ۱۷۰، ۲۰۰ و ۲۳۰°C و برای زمان ۳ دقیقه نمایش داده شده است. همانطورکه ملاحظه می‌شود، نواحی سفید رنگ توده‌ای بین تیغه‌های مارتنزیتی برای نمونه کوئنچ شده در پایین‌ترین دما، بیشترین مقدار را دارد. این نواحی مربوط به فاز آستنیت باقی‌مانده می‌باشد. قابل مشاهده است که، با افزایش دمای کوئنچ درصد آستنیت باقی‌مانده کاهش یافته است، این موضوع می‌تواند ناشی از کاهش کسرحجمی مارتنزیت در مرحله کوئنچ (با افرایش دمای کوئنچ) بوده و در نتیجه باعث تشکیل کسرحجمی بالاتری از آستنیت باقی‌مانده شود. در ادامه، در مرحله پارتیشن‌بندی، طی مدت زمان کوتاه ۳ دقیقه، آستنیت باقی‌مانده برای نمونه‌های حاوی آستنیت بالاتر، پایدار نشده (به دلیل کسرحجمی پایین‌تر مارتنزیت و نفوذ کمتر کربن) و پس از سردکردن از دمای پارتیشن‌بندی، مقداری از آستنیت باقی‌مانده به مارتنزیت استحاله می‌یابد. به عبارت دیگر، در دمای کوئنچ بالاتر نسبت حجمی آستنیت به مارتنزیت در حالت متعادل تری بوده درنتیجه میزان استنیت پایدار شده افزایش داشته و این نسبت با کاهش دمای کوئنچ از نسبت ایده ال فاصله گرفته و استنیت باقیمانده کمتری پایدارگردیده است [3,7]. نهایتا برای دمای کوئنچ بالاتر، آستنیت باقی‌مانده کمتری در ریزساختار تشکیل خواهد شد. توجه به این نکته ضروری است که زمان پارتیشن‌بندی نقش مهمی در پایداری آستنیت در مرحله پارتیشن‌بندی دارد که در بخش بعدی به آن پرداخته شده است. نکته دیگری که در تصاویر ریزساختاری می‌توان به آن اشاره کرد، ظریف‌تر شدن تیغه‌های مارتنزیتی با افزایش دمای کوئنچ می‌باشد. این موضوع می‌تواند مرتبط با مارتنزیت‌های تشکیل شده از آستنیت‌های باقی‌مانده پس از مرحله پارتیشن‌بندی باشد (مارتنزیت ثانویه). با توجه به افزایش نسبی درصد کربن در آستنیت‌های باقی‌مانده، متعاقبا فاز مارتنزیتی ظریف‌تری در بین ساختار مارتنزیتی قبلی تشکیل می‌شود و نمای کلی ساختار، ظریف‌تر مشاهده می‌شود. تحت چنین شرایطی، استحکام فولاد می‌تواند افزایش پیدا کند که در بخش های بعدی به آن پرداخته شده است [14].

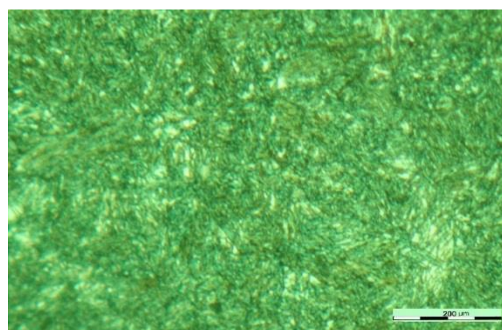

الف


ب

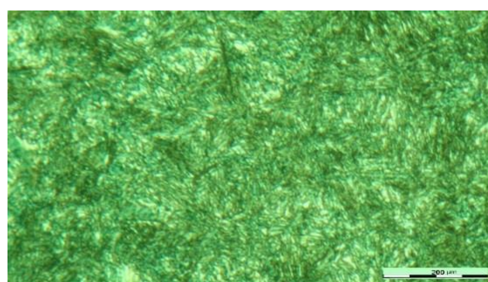

ج

شکل ٤ تصاویر ریزساختاری نمونه‌های کوئنچ شده در دمای مختلف الف)۱۷۰، ب) ۲۰۰ و ج) ۲۳۰ برحسب درجه سانتیگراد با زمان پارتیشن بندی ۳ دقیقه.

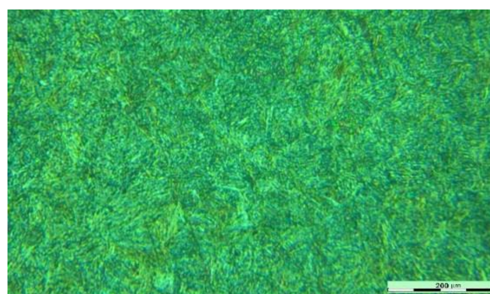
تاثیر زمان پارتیشن‌بندی. پارتیشن‌بندی یک فرآیند نفوذی است که با افزایش دما و زمان فرآیند، نفوذ بیشتر و سریعتر انجام می‌گردد؛ یعنی کربن بیشتری از ساختار مارتنزیتی خارج شده و به آستنیت باقی‌مانده نفوذ می‌کند و مقدار آستنیت باقی‌مانده بیشتری پایدار می‌گردد [7]. با اعمال کرنش، بخشی از آستنیت به مارتنزیت ریز سوزنی تبدیل شده و همراه با مارتنزیت موجود باعث افزایش استحکام می‌شود [14]. در این بخش، تاثیر زمان پارتیشن‌بندی بر روی ریزساختار فولاد مورد تحقیق برای دمای کوئنچ ۱۷۰°C مورد ارزیابی قرار گرفته است. در شکل (۵)، تصاویر ریزساختاری بدست آمده پس از کوئنچ در دمای ۱۷۰°C و پارتیشن‌بندی در دمای ۳۰۰°C در زمان‌های مختلف نشان داده شده است. واضح است که افزایش زمان پارتیشن‌بندی تاثیرات مهمی در ریزساختار ایجاد کرده است.



الف



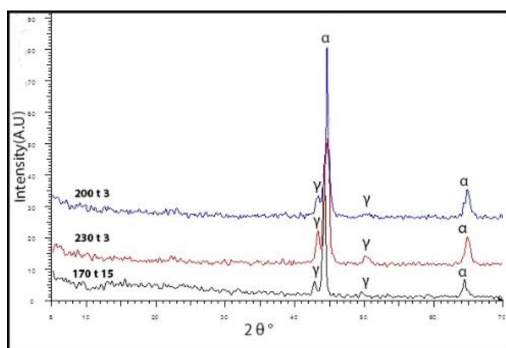
ب



ج

شکل ۵ تصاویر ریزساختاری نمونه های کوئنچ شده در دمای ۱۷۰ و زمان‌های مختلف پارتیشن بندی الف)۸ ،ب)۱۵ و ج)۳۰ (برحسب دقیقه).

بطورکلی، ریزساختار شامل فاز مارتنزیت و جزایر آستنیت باقی‌مانده می‌باشد. بیشترین مقدار آستنیت باقی‌مانده (نواحی سفید رنگ بلوکی شکل) مربوط به کمترین زمان پارتیشن‌بندی ۳دقیقه (شکل ٤-الف)) است. با افزایش زمان پارتیشن‌بندی به ۸ دقیقه (شکل ٥-الف))، به نظر می‌رسد آستنیت باقی‌مانده کاهش یافته است. با افزایش بیشتر زمان، نواحی سفید رنگ مربوط به آستنیت باقی‌مانده بطور واضح قابل مشاهده نمی‌باشد. این موضوع به معنی وجود نداشتن آستنیت باقی‌مانده برای نمونه‌های پارتیشن‌بندی شده به مدت ۱۵ و ۳۰ دقیقه نمی‌باشد ولی می‌توان گفت مقدار آستنیت باقی‌مانده در این نمونه‌ها بطور محسوسی کاهش یافته است.



شکل ٦ الگوی XRDنمونه های ١٥-١٧٠ (موج آبی) ، ٣-٢٠٠ (موج قهوه‌ای) و ٣-٢٣٠(موج قرمز).

در شکل (٦)، الگوی پراش پرتوی ایکس برای نمونه‌های ۱۵-۱۷۰، ۳-۲۰۰و ۳-۲۳۰ آورده شده است. برای بررسی مقدار کسرحجمی آستنیت باقیمانده در هر کدام از نمونه ها از رابطه (۱) استفاده شده است.

$$V\gamma = \frac{(\frac{1}{q}\Sigma_{j=1}^{q} \frac{I_{\gamma j}}{R_{\gamma j}})}{(\frac{1}{q}\Sigma_{j=1}^{q} \frac{I_{\gamma j}}{R_{\gamma j}}) + (\frac{1}{p}\Sigma_{j=1}^{p} \frac{I_{\alpha j}}{R_{\alpha j}})} \qquad (۱)$$

جائیکه Vγ کسرحجمی آستنیت باقیمانده، $I_{\gamma j}$ شدت پیک آستنیت مربوط به صفحه کریستالی (hkl)، $R_{\gamma j}$ شدت پیک تئوری برای همان صفحه کریستالی آستنیت، $I_{\alpha j}$ شدت پیک مارتنزیت (یا بینیت) مربوط به صفحه کریستالی (hkl) و $R_{\alpha j}$ شدت پیک تئوری برای همان صفحه کریستالی مارتنزیت (یا بینیت) می باشد. مقدار شدت پیک تئوری براساس محاسبات انجام شده توسط Jatczak تعیین می شود [23]. در جدول (٥)

کسر حجمی آستنیت باقیمانده محاسبه شده بر اساس نتایج XRD آورده شده است.

جدول ٥ کسر حجمی آستنیت باقیمانده(٪)

عنوان قطعه	١٧٠-١٥	٢٠٠-٣	٢٣٠-٣
حجم آستنیت باقیمانده	٤	٨/٥	١٣

همانطور که ملاحظه می‌شود، بیشترین مقدار آستنیت باقی مانده مربوط به نمونه ٣-٢٣٠ (حدود ١٣ درصد) و کمترین مقدار آستنیت باقی‌مانده مربوط به نمونه ١٥-١٧٠ (حدود ٤ درصد) است. این نتایج به خوبی تاثیر دما کوئنچ و زمان پارتیشن‌بندی بر روی میزان آستنیت باقی‌مانده را نشان می‌دهد. در بخش قبل توضیح داده شد که در دمای کوئنچ ١٧٠درجه سانتیگراد، به دلیل کسرحجمی بالاتر مارتنزیت، آستنیت باقی‌مانده در زمان‌های کوتاه پارتیشن‌بندی (در اینجا ٣ دقیقه) بواسطه نفوذ گسترده عنصر کربن به داخل فاز آستنیت پایدار می‌شود؛ درحالیکه افزایش بیشتر زمان پارتیشن‌بندی باعث استحاله آستنیت باقی‌مانده و از بین رفتن آن خواهد شد.

این موضوع توسط نتایج XRD نیز تایید شده است. البته می‌توان پیش‌بینی کرد که برای دماهای بالاتر کوئنچ، زمان‌های طولانی پارتیشن‌بندی منجر به پایداری مقدار بیشتری آستنیت باقی‌مانده می‌شود. زیرا در دماهای بالاتر کوئنچ، کسرحجمی بالاتری از آستنیت باقی‌مانده در ریزساختار تشکیل می‌شود (قبل از پارتیشن‌بندی) و نفوذ میزان کافی عنصر کربن و پایدار شدن آنها نیاز به زمان بیشتری دارد.

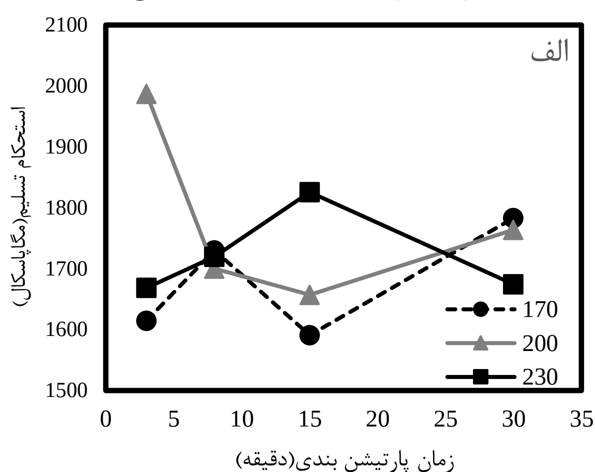
موضوع دیگری که در تصاویر شکل (٥) قابل روئیت می‌باشد، ظریف‌تر شدن ساختار تیغه‌های مارتنزیتی است. در مورد نمونه پارتیشن‌بندی شده به مدت ١٥ و ٣٠ دقیقه (شکل ٥ (ب و ج)) یک ساختار مارتنزیت تمپر شده بوجود آمده است. این موضوع نشان دهنده این است که افزایش بیش از حد زمان پارتیشن‌بندی، علاوه بر تجزیه آستنیت باقی‌مانده، باعث تمپرشدن ساختار مارتنزیتی نیز می‌شود. حتی امکان تشکیل رسوبات سمنتیتی بسیار ریز نیز در زمان‌های طولانی وجود دارد که می‌تواند موجبات افزایش نسبی استحکام را فراهم کند. نتایج تحقیقات انجام شده توسط سانتوفیمیا و همکاران نیز موید این موضوع می‌باشد [24]. نتایج بدست آمده توسط این محققین حاکی از آن است که افزایش زمان پارتیشن‌بندی باعث کاهش پایدارسازی آستنیت باقی‌مانده می‌شود. با افزایش زمان پارتیشن‌بندی میزان آستنیت باقی‌مانده تا حدی افزایش یافته و از یک نقطه به بعد میزان کسر آستنیت با افزایش دمای پارتیشن‌بندی کاهش خواهد یافت. دلیل این اتفاق وجود رسوب کاربید و فرآیندهای رقابتی در فصل مشترک‌های مارتنزیت-آستنیت و یا استحاله بینیتی خواهد بود [7].

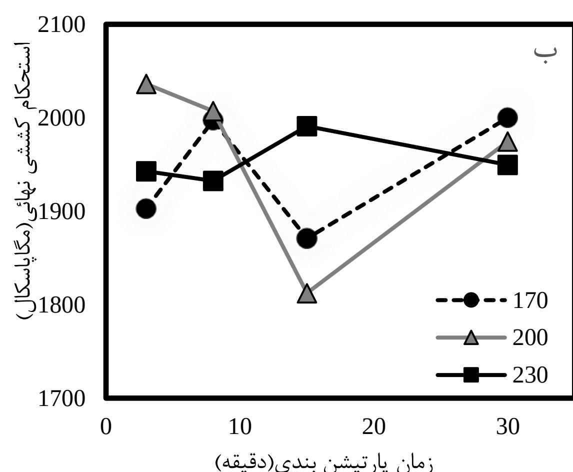
خواص کششی. در شکل (٧) به منظور بررسی دقیق‌تر خواص بدست آمده از آزمون کشش، خواص کششی مختلف بدست آمده شامل استحکام کششی (UTS) (Ultimate Tensile Strength)، استحکام تسلیم (YS) (Yield Strength)، ازدیاد طول کل (TEL) (Total Elongation)، ازدیاد طول یکنواخت (UEL) (Uniform Elongation) و میزان کاهش سطح مقطع (RA) (Reduction in Area) در نمودارهای جداگانه‌ای برای شرایط مختلف عملیات Q&P رسم شده است (شکل ٧) نتایج استحکام تسلیم در شکل (٧-الف) ارائه شده است. بالاترین استحکام تسلیم در این عملیات مربوط به نمونه کوئنچ شده در دمای ٢٠٠℃ با زمان پارتیشن‌بندی ٣ دقیقه بوده است. همچنین میزان استحکام تسلیم نمونه‌های کوئنچ شده در دمای ١٧٠℃ با زمان‌های پارتیشن‌بندی مختلف به جز در زمان ٣٠ دقیقه از استحکام تسلیم سایر نمونه‌ها پایین‌تر بوده است. نکته دیگر اینکه، برای دمای ٢٠٠℃، با افزایش زمان پارتیشن‌بندی تا ١٥ دقیقه، استحکام تسلیم از حدود ١٩٨٧ مگاپاسکال تا حدود ١٦٥٧ مگاپاسکال (تقریبا ٣٣٠ مگاپاسکال) کاهش یافته است. باتوجه به اینکه، استحکام تسلیم بیانگر تنش لازم برای شروع تغییرشکل پلاستیک است، کاهش قابل توجه آن با افزایش زمان پارتیشن‌بندی را می‌توان متاثر از وقوع تمپر فاز مارتنزیتی و پایدارسازی کسر حجمی بالاتری از آستنیت در ریزساختار نسبت داد [25].

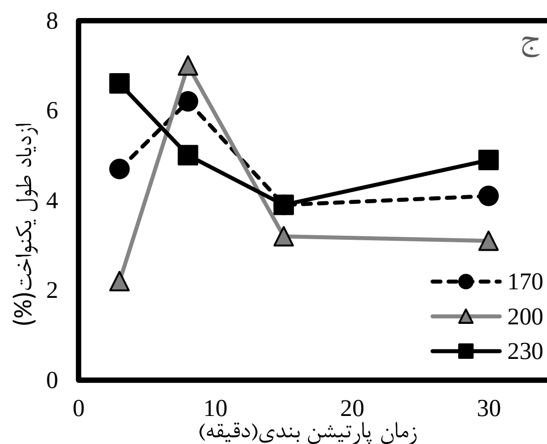
از طرفی، رفتار متفاوتی برای استحکام تسلیم نمونه های کوئنچ شده در دمای ٢٣٠℃ مشاهده می‌شود. در واقع، برای این نمونه‌ها، با افزایش زمان پارتیشن‌بندی به ١٥ دقیقه، افزایش استحکام تسلیم رخ داده است. این موضوع می‌تواند ناشی از افزایش کسرحجمی آستنیت باقی‌مانده برای این نمونه‌ها (بواسطه دمای کوئنچ بالاتر) ولی استحاله آنها به مارتنزیت ثانویه پس از پارتیشن‌بندی باشد [26]. نمونه کوئنچ شده در دمای ٢٠٠℃ رفتاری تقریبا شبیه به نمونه کوئنچ شده در دمای ١٧٠℃ (به جز زمان پارتیشن‌بندی ٣٠ دقیقه) داشته است. لازم به توضیح است که افزایش زمان پارتیشن‌بندی باعث کاهش آستنیت باقی‌مانده و

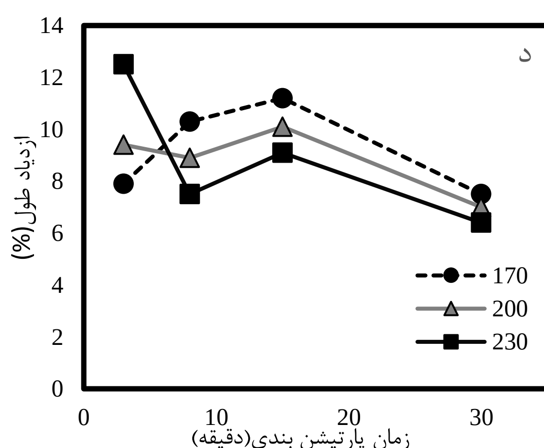
تشکیل رسوبات کاربیدی نیز می‌شود [27]. این موضوع می‌تواند موجبات افزایش استحکام را فراهم کند که برای زمان پارتیشن‌بندی ۳۰ دقیقه نیز رخ داده است.

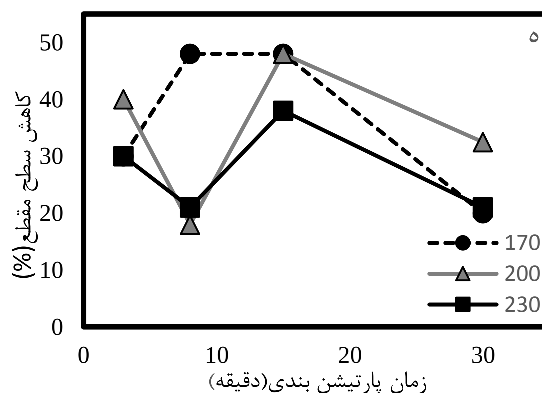
درخصوص استحکام کششی (شکل۷–ب))، رفتار تقریبا مشابهی با استحکام تسلیم بدست آمده است. در واقع، تحولات ریزساختاری در شرایط عملیات حرارتی مختلف، تاثیر مشابهی بر روی استحکام تسلیم و استحکام کششی داشته است.











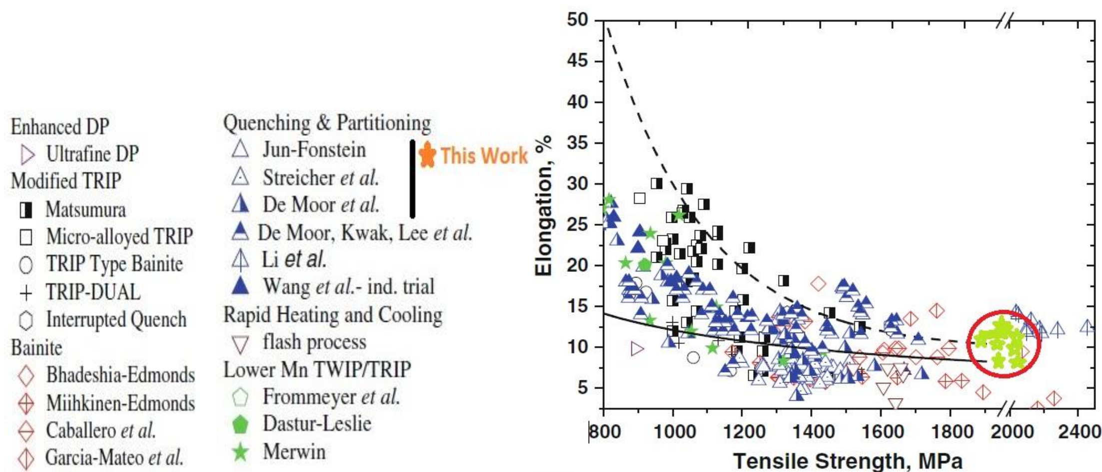
شکل ۷ نمودارهای : الف) استحکام کششی(UTS)، ب) استحکام تسلیم (YS)، ج) ازدیاد طول (TEL)، د) ازدیاد طول یکنواخت (UEL) و ه) میزان کاهش سطح مقطع(RA) بر حسب زمان پارتیشن‌بندی

باتوجه به شکل (۷-ج)، حداقل انعطاف‌پذیری کل برای نمونه‌های پارتیشن‌بندی شده در ۳۰ دقیقه بدست آمده است. این موضوع می‌تواند متاثر از تشکیل رسوبات کاربیدی در ریزساختار و از بین رفتن آستنیت باقی‌مانده باشد. بالاترین ازدیاد طول کل برای نمونه ۳-۲۳۰ به میزان ۱۲/۵٪ بدست آمده است. با مقایسه شکل (۷-الف) و (۷-ج) می‌توان گفت که استحکام تسلیم و ازدیاد طول کل در تقابل با یکدیگر رفتار کرده‌اند. به عبارت دیگر، با افزایش استحکام تسلیم، ازدیاد طول کل کاهش یافته است. البته این موضوع در مورد ازدیاد طول یکنواخت (شکل ۷-د) صادق نیست. بالاترین ازدیاد طول یکنواخت برای نمونه‌های ۸-۱۷۰، ۸-۲۰۰ و ۳-۲۳۰ بدست آمده است. افزایش زمان پارتیشن‌بندی برای این نمونه‌ها (یعنی بیش از ۸ دقیقه برای نمونه کوئنچ شده در ۱۷۰ و ۲۰۰ درجه سانتیگراد و بیش از ۳ دقیقه برای نمونه کوئنچ شده در ۲۳۰ درجه سانتیگراد) باعث افت تغییرشکل همگن می‌گردد. ازدیاد طول یکنواخت به معنی تغییرشکل همگن بدون وقوع گلویی شدن (وقوع ناپایداری) می‌باشد. افزایش یا کاهش این پارامتر قطعا وابسته به میزان آستنیت باقی‌مانده بعنوان یک فاز شکل‌پذیر در ریزساختار است. فیلم‌های آستنیتی که بین لایه‌های مارتنزیت قرار گرفته در مقایسه با فاز مارتنزیت، فازی نرم‌تر و انعطاف‌پذیر را تشکیل می‌دهند و در نتیجه از رشد ترک‌های ریز جلوگیری کرده و موجبات افزایش انعطاف‌پذیری را فراهم می‌کند [28]. از طرف دیگر، افزایش بیش از اندازه زمان پارتیشن‌بندی می‌تواند موجب از بین رفتن آستنیت باقی‌مانده و حتی تشکیل رسوبات کاربیدی گردد که در نتیجه، ازدیاد طول یکنواخت را کاهش خواهد داد [16].

نتایج میزان کاهش سطح مقطع نمونه‌ها در شکل (۷- ه) ارائه شده است. بهترین مقادیر کاهش سطح مقطع مربوط به دماهای کوئنچ ۱۷۰ و ۲۰۰ درجه سانتیگراد در زمان پارتیشن متفاوت می‌باشد. مشاهده می‌شود که دو نمونه کوئنچ شده در دمای ۲۰۰ و ۲۳۰ درجه سانتیگراد رفتار یکسانی برحسب زمان پارتیشن‌بندی داشته‌اند. با افزایش زمان از ۳ به ۸ دقیقه میزان کاهش سطح مقطع کاهش داشته و با افزایش زمان به ۱۵ دقیقه میزان RA افزایش یافته است. سپس با افزایش زمان به ۳۰ دقیقه مقدار RA مجددا کاهش یافته است. ولی در نمونه کوئنچ ۱۷۰°C با افزایش زمان پارتیشن‌بندی به ۸ دقیقه میزان RA افزایش داشته و تا زمان ۱۵ دقیقه مقدار آن ثابت باقی مانده است و سپس با افزایش زمان تا ۳۰ دقیقه مقدار RA کاهش یافته است. همانطور که در بررسی ریزساختار و کسر حجمی آستنیت باقی‌مانده بر اساس XRD مشخص شده، مقدار آستنیت پایدارشده در دو دمای ۱۷۰ و ۲۰۰ درجه سانتیگراد نسبت به دمای کوئنچ ۲۳۰°C در زمان ۳ دقیقه کمتر بوده است که می‌تواند به دلیل عدم پایداری آستنیت باقی‌مانده باشد. در این شرایط با کم شدن میزان فاز آستنیت پایدارشده مقدار RA کاهش خواهد یافت [24]. میزان RA در نمونه ۲۳۰°C تا زمان پارتیشن‌بندی ۱۵ دقیقه کاهش داشته است. سپس این مقدار در زمان ۳۰ دقیقه افزایش یافته است که می‌تواند به دلیل تشکیل کاربید یا استحاله بینیتی در نمونه باشد.

براساس خواص کششی بدست آمده می‌توان گفت بهترین خواص کششی برای نمونه کوئنچ شده در دمای ۱۷۰°C و پارتیشن‌بندی شده در دمای ۸ دقیقه با استحکام کششی ۱۹۹۷/۳MPa، استحکام تسلیم ۱۷۳۰/۲MPa، ازدیاد طول۱۰/۳ ٪ و کاهش سطح مقطع ٤٨٪ بدست آمده است. می‌توان گفت که مفتولی با مشخصاتی این چنینی(ساختار و خواص کششی) دارای قابلیت کششی سرد عالی خواهد بود و می‌تواند گزینه خوبی برای تولید فنرها و سیم‌های پراستحکام باشد.

در شکل (۸)، نتایج تحقیق حاضر با طیف گسترده‌ای از فولادهای استحکام بالا مقایسه شده است. ملاحظه می‌شود که نتایج بدست آمده بیانگر ارتقا خواص کششی فولاد مورد تحقیقی در مقایسه با سایر نتایج بدست آمده برای فرآیند Q-P-T است. ذکر این نکته ضروری است که در تحقیق حاضر، هیچگونه تمپری بر روی نمونه‌ها انجام نشده است ولی نتایج حاصل از این تحقیق بسیار مطلوب (استحکام و انعطاف پذیری بالاتر) بوده است.



شکل ۸ جایگاه فولاد Q&P شده در تحقیق حاضر در بین سایر فولادها [2]

نتیجه‌گیری

- عملیات حرارتی کوئنچ پارتیشن‌بندی باعث تشکیل یک ریزساختار میکروکامپوزیتی در فولاد ۱/۷۱۰۲ شده است.
- افزایش زمان پارتیشـــن‌بندی پس از کوئنچ، باعث ازبین رفتن آســتنیت باقیمانده و همچنین تشـکیل رسـوبات کاربیدی در ریزساختار می‌گردد.
- انجام عملیات کوئنچ در دمای ۱۷۰ درجه سانتیگراد و پارتیشن‌بندی در دمای ۳۰۰ درجه سانتیگراد به مدت ۸ دقیقه منجر به حصول استحکام کششی ۱۹۹۷ مگاپاسکال، استحکام تسلیم ۱۷۳۰ مگاپاسکال، ازدیاد طول ۱۰/۳ درصد و میزان کاهش سطح مقطع ٤٨ گردیده است.
- بالاترین استحکام بدست آمده برابر با ۲۰۳٦ مگاپاسکال مربوط به نمونه ۳–۲۰۰ و کمترین مقدار استحکام کششی برابر با ۱۸۷۱ مگاپاسکال مربوط به نمونه ۱۵–۱۷۰ می‌باشد.
- مقایسه خواص کششی بدست آمده با سایر فولادها بیانگر حصول خواصی قابل مقایسه با فولادهای آلیاژی بسیار گرانقیمت می باشد.

مراجع

1. Connolly, D. S., Kohar, C. P., Muhammad, W., Hector Jr, L. G., Mishra, R. K., & Inal, K., "A coupled thermomechanical crystal plasticity model applied to Quenched and Partitioned steel", *International Journal of Plasticity*, Vol. 133, p. 102757, (2020).
2. Härtel, M., Wilke, A., Dieck, S., Landgraf, P., Grund, T., Lampke, T., ... & Wappler, S., "On the Q&P Potential of a Commercial Spring Steel", *Metals*, Vol. 11, No. 10, p. 1612, (2021).
3. Speer, J. G., De Moor, E., Findley, K. O., Matlock, D. K., De Cooman, B. C., & Edmonds, D. V., "Analysis of microstructure evolution in quenching and partitioning automotive sheet steel", *Metallurgical and Materials Transactions* A, Vol. 42, No. 12, pp. 3591-3601, (2011).
4. Franceschi, M., Pezzato, L., Gennari, C., Fabrizi, A., Polyakova, M., Konstantinov, D., ... & Dabalà, M., "Effect of intercritical annealing and austempering on the microstructure and mechanical properties of a high silicon manganese steel", *Metals*, Vol. 10, No. 11, p. 1448, (2020).
5. Hidalgo, J., Celada-Casero, C., & Santofimia, M. J., "Fracture mechanisms and microstructure in a medium Mn quenching and partitioning steel exhibiting macrosegregation", *Materials Science and Engineering*: A, Vol. 754, pp.

766-777, (2019).

6. Sabirov, I., Santofimia, M. J., & Petrov, R. H., "Advanced High-Strength Steels by Quenching and Partitioning", *Metals*, Vol. 11, No. 9, p. 1419, (2021).
7. Speer, J., Matlock, D. K., De Cooman, B. C., & Schroth, J. G., "Carbon partitioning into austenite after martensite transformation", *Acta materialia*, Vol. 51, No. 9, pp. 2611-2622, (2003).
8. Jirková, H., Mašek, B., Wagner, M. F. X., Langmajerová, D., Kučerová, L., Treml, R., & Kiener, D., "Influence of metastable retained austenite on macro and micromechanical properties of steel processed by the Q&P process", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 615, pp. 163-168, (2014).
9. Yu, J. X., Wang, L. Y., Chi, R. A., Zhang, Y. F., Xu, Z. G., & Guo, J., "Competitive adsorption of Pb2+ and Cd2+ on magnetic modified sugarcane bagasse prepared by two simple steps", *Applied Surface Science*, Vol. 268, pp. 163-170, (2013).
10. Liao, S., "An optimal homotopy-analysis approach for strongly nonlinear differential equations", *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, Vol. 15, No. 8, pp. 2003-2016, (2010).
11. Wang, X. D., Zhong, N., Rong, Y. H., Hsu, T. Y., & Wang, L., "Novel ultrahigh-strength nanolath martensitic steel by quenching–partitioning–tempering process", *Journal of Materials Research*, Vol. 24, No. 1, pp. 260-267, (2009).
12. Zurnadzhy, V. I., Efremenko, V. G., Wu, K. M., Azarkhov, A. Y., Chabak, Y. G., Greshta, V. L., ... & Pomazkov, M. V., "Effects of stress relief tempering on microstructure and tensile/impact behavior of quenched and partitioned commercial spring steel", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 745, pp. 307-318, (2019).
13. Meigui, O., Chunlin, Y., Jie, Z., Qifan, X., & Huina, Q., "Influence of Cr content and Q–P–T process on the microstructure and properties of cold-coiled spring steel", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 697, pp. 43-54, (2017).
14. Zhou, W., Sun, Y., Wang, Q., & Ding, L., "Effect of quenching and partitioning process to low-alloy wear resistant steel", *Journal of Materials Research*, Vol. 31, No. 5, pp. 663-669, (2016).
15. Forouzan, F., Guitar, M. A., Vuorinen, E., & Mücklich, F., "Effect of carbon partitioning, carbide precipitation, and grain size on brittle fracture of ultra-high-strength, low-carbon steel after welding by a quenching and partitioning process", *Metals*, Vol. 8, No. 10, p. 747, (2018).
16. Di Schino, A., Emilio Di Nunzio, P., & Maria Cabrera, J., "Effect of quenching & partitioning process on a low carbon steel", *Advanced Materials Letters*, Vol. 8, No. 5, pp. 641-644, (2017).
17. Bagliani, E. P., Santofimia, M. J., Zhao, L., Sietsma, J., & Anelli, E., "Microstructure, tensile and toughness properties after quenching and partitioning treatments of a medium-carbon steel", *Materials Science and Engineering*: A, Vol. 559, pp. 486-495, (2013).
18. Lu, J., Yu, H., Kang, P., Duan, X., & Song, C., "Study of microstructure, mechanical properties and impact-abrasive wear behavior of medium-carbon steel treated by quenching and partitioning (Q&P) process", *Wear*, Vol. 414, pp. 21-30, (2018).
19. Wang, Z., & Huang, M., "Improving Hydrogen Embrittlement Resistance of Hot-Stamped 1500 MPa Steel Parts That Have Undergone a Q&P Treatment by the Design of Retained Austenite and Martensite Matrix", *Metals*, Vol. 10, No.

12, p. 1585, (2020).

20. Arribas, M., Gutiérrez, T., Del Molino, E., Arlazarov, A., Diego-Calderón, D., Martin, D., ... & Santofimia, M. J., "Austenite reverse transformation in a Q&P route of Mn and Ni added steels", *Metals*, Vol. 10, No. 7, p. 862, (2020).
21. Aoued, S., Danoix, F., Allain, S. Y., Gaudez, S., Geandier, G., Hell, J. C., ... & Gouné, M., "Microstructure evolution and competitive reactions during quenching and partitioning of a model fe–c–mn–si alloy", *Metals*, Vol. 10, No. 1, p. 137, (2020).
22. Vercruysse, F., Celada-Casero, C., Linke, B. M., Verleysen, P., & Petrov, R. H., "Temperature dependence of the static and dynamic behaviour in a quenching and partitioning processed low-si steel", *Metals*, Vol. 10, No. 4, p. 509, (2020).
23. Jatczak, C. F., "Retained austenite and its measurement by X-ray diffraction. *SAE Transactions*, Vol. 89, pp. 1657-1676, (1980).
24. Santofimia, M. J., Zhao, L., Petrov, R., Kwakernaak, C., Sloof, W. G., & Sietsma, J., "Microstructural development during the quenching and partitioning process in a newly designed low-carbon steel", *Acta Materialia*, Vol. 59, No. 15, pp. 6059-6068, (2011).
25. Jirková, H., Kučerová, L., & Mašek, B., "Effect of Quenching and Partitioning Temperatures in the QP Process on the Properties of AHSS with Various Amounts of Manganese and Silicon", In *Materials Science Forum* ,Vol. 706, pp. 2734-2739, Trans Tech Publications Ltd, (2012).
26. Edmonds, D. V., He, K., Rizzo, F. C., De Cooman, B. C., Matlock, D. K., & Speer, J. G., "Quenching and partitioning martensite—A novel steel heat treatment", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 438, pp. 25-34, (2006).
27. Clarke, A. J., Speer, J. G., Miller, M. K., Hackenberg, R. E., Edmonds, D. V., Matlock, D. K., ... & De Moor, E., "Carbon partitioning to austenite from martensite or bainite during the quench and partition (Q&P) process: A critical assessment", *Acta materialia*, Vol. 56, No. 1, pp. 16-22, (2008).
28. Zhou, S., Zhang, K., Wang, Y., Gu, J. F., & Rong, Y. H., "High strength-elongation product of Nb-microalloyed low-carbon steel by a novel quenching–partitioning–tempering process", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 528, No. 27, pp. 8006-8012, (2011).
29. Wang, C., & HUI, W., "Study on the martensite in low carbon CrNi3Si2MoV steel treated by Q&P process", *Acta Metall Sin*, Vol. 47, No. 6, pp. 720-726, (2011).